

引用格式: 李天成, 方维萱, 王磊, 等, 2022. 综合地球物理方法找矿应用: 以智利科皮亚波地区月亮山磁铁矿型 IOCG 矿床为例 [J]. 地质力学学报, 28 (1): 22–35. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222802

Citation: LI T C, FANG W X, WANG L, et al., 2022. Application of integrated geophysical method in prospecting: A case study of the magnetite-type IOCG deposits in the Moon Mountain exploration area, Copiapo, Chile [J]. Journal of Geomechanics, 28 (1): 22–35. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222802

综合地球物理方法找矿应用: 以智利科皮亚波地区月亮山磁铁矿型 IOCG 矿床为例

李天成^{1,2}, 方维萱^{1,2}, 王磊¹, 陈家乐¹, 张平¹

LI Tiancheng^{1,2}, FANG Weixuan^{1,2}, WANG Lei¹, CHEN Jiale¹, ZHANG Ping¹

1. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012;

2. 北京矿产地质研究院, 北京 100012

1. China Non-Ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China;

2. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China

Application of integrated geophysical method in prospecting: A case study of the magnetite-type IOCG deposits in the Moon Mountain exploration area, Copiapo, Chile

Abstract: Many medium to large magnetite-type IOCG deposits have been found in the Copiapo area of Chile, which is located in the north fragment of the Chilean iron belt on the east side of the coastal mountain belt. The formation of these deposits is closely related to the neutral mafic volcanic rocks in the continental margin arc under the background of ocean subduction and the intrusion center of Early Cretaceous intermediate-acid magmatic rocks intruded in the volcanic sedimentary formation. The metallogenic belt is largely covered by Quaternary gravel layer. Using integrated geophysical methods with metallogenic geological characteristics to locate the concealed deposits (ore-bodies) under the overburden has become a key technology and a practical demand. We conducted an in-depth study of the metallogenic geological characteristics of magnetite-type IOCG deposits in the Copiabo area, and interpreted the preliminary exploration target by aeromagnetic deep-geological interpretation. Combining the interpretation results with the statistical analysis of metallogenic geological-physical parameters of magnetite-type IOCG deposits, a metallogenic geological-geophysical anomaly model of magnetite-type IOCG deposits in the Copiabo area is established. A large concealed magnetite-type IOCG deposit was found and verified by drilling in the deep target area delineated in the Quaternary coverage area of the Moon Mountain exploration area by using the integrated geophysical method.

Key words: coastal mountain belt in Chile; Atacama fault zone; magma arc; geological-geophysical modeling; IOCG deposit; integrated geophysics

摘 要: 智利科皮亚波地区地处海岸山带东侧的智利铁带北段, 已发现多个中—大型磁铁矿型 IOCG 矿床, 该类矿床的形成与大洋俯冲背景下陆缘弧中性—铁镁质火山岩和火山—沉积建造中早白垩世中酸性岩浆岩的侵入中心密切相关。该成矿带大面积被第四系砂砾层覆盖, 在成矿地质特征研究基础上, 采用综合地球物理方法对覆盖层下隐伏矿床(体)进行定位预测成为技术关键并具有现实需求。通过深入研究科皮亚波地区磁

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项基金 (201511016-1); 国家科技支撑计划 (2006BAB01B09); 科技部科研院所技术开发专项 (2011EG115022)

This research is financially supported by the Special Fund for Public Welfare Scientific Research of the Ministry of Natural Resources (Grant No. 201511016-1), the National Science and Technology Support Plan (Grant No. 2006BAB01B09), and the Special Project for Technology Development of Scientific Research Institutes of the Ministry of Science and Technology (Grant No. 2011EG115022)

第一作者简介: 李天成 (1969—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事金属矿产勘查和找矿预测。E-mail: 283699865@qq.com

收稿日期: 2021-10-12; **修回日期:** 2021-12-14; **责任编辑:** 范二平

铁矿型 IOCG 矿床的成矿地质特征,并采用航磁深部地质解译初选勘查靶区,结合磁铁矿型 IOCG 矿床成矿地质-物性参数统计分析,建立了勘查区磁铁矿型 IOCG 矿床成矿地质-地球物理异常模式,采用综合地球物理方法在月亮山勘查区第四系覆盖区圈定的深部靶位经钻孔验证,发现了大型隐伏磁铁矿型 IOCG 矿床。

关键词: 智利海岸山带;阿塔卡玛断裂带;岩浆弧;地质-地球物理建模;IOCG 矿床;综合地球物理

中图分类号: P612; P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 01-0022-14

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222802

0 引言

全球铁氧化物铜金 (IOCG) 矿床受到广泛关注,其中,智利中北部海岸山带是勘查热点 (Marschik and Fontboté, 1996; Hitzman, 2000; Sillitoe, 2003; 张兴春, 2003; 毛景文等, 2008; 方维萱等, 2009, 2013, 2018, 2021; 李建旭等, 2011; 方维萱, 2012, 2019; 方维萱和李建旭, 2014)。智利海岸山带 (32°S—26°S) 东侧发育 Cu-Fe-Au (-Ag-Zn) 型 IOCG 矿床 (Candelaria/坎德拉利亚)、Cu-Au 型 IOCG 矿床 (Manto Verde/曼托贝尔德) 和磁铁矿型 IOCG 矿床 (Cerro Iman/赛罗伊曼、Romeral/罗梅拉尔等) 3 种亚类型,与阿塔卡玛 (Atacama) 断裂系统中的陆缘钙碱性火山岩关系密切,中性-铁镁质火山-沉积建造中早白垩世中酸性岩浆岩的侵入中心对大型 IOCG 矿床的空间就位具有决定性作用 (Hitzman, 2000; Marschik and Fontboté, 2001; Sillitoe, 2003; Oyarzun et al., 2003; Ramírez et al., 2006; Benavides et al., 2007; 方维萱等, 2009, 2018; 方维萱和李建旭, 2014)。

目前,关于智利 IOCG 矿床的赋矿围岩、深成岩浆作用、控矿构造、成矿流体来源、形成时代等方面的研究以及矿产资源勘查都取得了显著进展。①成矿与中生代中基性 (闪长质-辉长质) 岩浆向中酸性演化有关,属岩浆热液成因 (Sillitoe, 2003; Sillitoe and Perelló, 2005)。曼托贝尔德 Cu-Au 型 IOCG 矿床产于主岩浆弧带,赋矿围岩为中-上侏罗统火山-沉积岩序列,早白垩世中粒花岗岩、含黑云母闪长岩和二长闪长岩深成侵入岩 (Lara and Godoy, 1998) 与成矿关系密切;矿床受阿塔卡玛断裂的北北西向分支断裂控制; Benavides et al. (2007) 通过对曼托贝尔德矿床硫和氧同位素研究认为,早期流体为岩浆来源,晚期弧后盆地中海水蒸发卤水混入了热液系统,对

矿床形成起到了关键性作用。坎德拉利亚 Cu-Au (-Ag-Zn) 型 IOCG 矿床产于岛弧与弧后盆地的过渡带,主要赋矿层位为下白垩统中性火山岩和火山碎屑岩,早白垩世晚期的石英二长岩、闪长岩侵入到弧后盆地火山-沉积地层中,与坎德拉利亚矿床形成具有密切关系 (Arévalo, 1995); 复式背斜叠加密集北北西-北西向高角度左旋横向断层对矿体具有重要的控制作用 (Marschik and Fontboté, 1996, 2001); 大量硫和氧同位素数据显示岩浆流体为热液系统的重要物质来源,同时轻的氧同位素在热液系统中的存在显示盆地卤水和大气水的加入以及流体混合可能是成矿物质主要的沉淀机制 (Marschik and Fontboté, 2001)。赛罗伊曼、罗梅拉尔等磁铁矿型 IOCG 矿床产于岛弧带的弧间盆地,赋矿围岩为下白垩统安山质熔岩和角砾岩,早白垩世晚期的二长岩、二长闪长岩和成矿在时空上关系最为密切 (Arévalo, 1995); 北北东向左旋走滑剪切变形产生的次级北西向高角度张性断裂构造为主要控矿构造; 金属硫化物硫同位素特征显示成矿流体主要为岩浆来源 (Espinoza et al., 1994; Vivallo et al., 1995; Marschik and Fontboté, 2001)。②主成矿时代以早白垩世为主, Benavides et al. (2007) 根据曼托贝尔德矿床中与成矿有关的蚀变中酸性侵入岩的绢云母 K-Ar 年龄、角闪石 K-Ar 年龄、角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 以及全岩 Rb-Sr 等时线和 U-Pb 锆石年龄等同位素定年数据 (Steiger and Jäger, 1977; Vila et al., 1996; Dallmeyer et al., 1996) 认为曼托贝尔德矿床的成矿年龄范围在 121~117 Ma。坎德拉利亚矿床黑云母-铁铝榴石-石榴石±堇青石蚀变凝灰岩中黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 加权平均年龄为 116.51±0.26 Ma (Marschik and Fontboté, 2001), 两个辉钼矿 Re-Os 同位素年龄分别为 114.2±0.6 Ma 和 115.2±0.6 Ma (Mathur et al., 2002), 主成矿年龄在 116~114 Ma。磁铁矿型 IOCG 矿床成矿高峰期集中在大约 115~110 Ma (Oyarzun et al., 2003)。成矿年龄的研

究成果对隐伏矿床成矿地质-勘查模式的建立具有重要的指导作用。③智利中北部海岸山带优越的成矿条件和巨大的矿产资源潜力吸引了国际上众多的矿业公司持续勘探和开发。坎德拉利亚 Cu-Fe-Au (-Ag-Zn) 型 IOCG 矿床探明矿石量约 366 Mt, Cu 平均品位 1.08%, Au 平均品位 0.26 g/t, Ag 平均品位 4.5 g/t (Ryan et al., 1995)。曼托贝尔德 Cu-Au 型 IOCG 矿床探明矿石量 540 Mt, 其中上部氧化矿体 140 Mt, Cu 平均品位 0.63%, 金平均品位为 0.4 g/t; 深部原生矿矿石资源量 400 Mt, Cu 平均品位 0.52%, Au 平均品位 0.11/t (Benavides et al., 2007)。智利磁铁矿型 IOCG 矿床探明矿石量在 100 Mt 以上的矿床多达 40 余个, 集中分布在智利海岸山带东侧 26°S 和 32°S 之间南北向长约 500 km, 东西宽约 30 km 的范围内。高品位 (60%TFE) 铁矿石资源总量 2000 Mt, 集中赋存在包括罗梅拉尔、赛罗伊曼、科罗拉多 (Colorado) 等大型矿床中 (Espinnoza et al., 1994; Vivallo et al., 1995; Oyarzun et al., 2003)。然而, 如何进行战略性勘查选区和隐伏 IOCG 矿床勘探是目前面临的技术难题; 在智利科皮亚波第四系冲洪积砾石、砂以及风成沙运积物覆盖区内寻找隐伏 IOCG 矿床更具有极大的挑战性和高风险性, 尤其是如何采用有效方法技术圈定深部勘查靶位并进行勘查验证成为技术关键。从成矿系统到勘查系统, 采用综合地球物理三维建模预测和成矿系统深部探测 (翟裕生, 2007; McCafferty et al., 2019; Skirrow et al., 2019; 吕庆田等, 2019; 方维萱等, 2021) 对解决上述技术难题具有现实意义。

在中国矿产资源风险勘查和开发鼓励政策下, 对智利 IOCG 成矿系统进行了深入研究, 通过对航磁资料解译进行战略性勘查靶区优选, 经快速评价和找矿靶位圈定, 钻孔验证取得了找矿突破 (李天成等, 2015; 方维萱等, 2018)。建立成矿地质-综合地球物理异常模式, 是进行隐伏矿床定位预测的有效途径 (李进文等, 2009; 申萍等, 2011; 刘嵘等, 2016; 方维萱等, 2021), 也有助于成矿系统探测和建模预测 (吕庆田等, 2019; 方维萱等, 2021), 但对智利月亮山大型磁铁矿型 IOCG 矿床地质-综合地球物理异常模式研究不够。

文章通过对科皮亚波地区磁铁矿型 IOCG 矿床研究, 针对成矿地质特征通过物性参数统计分析, 建立了磁铁矿型 IOCG 矿床成矿地质-地球物理异

常模式, 为实现从成矿系统到勘查系统、中国企业在境外同类型矿床战略性勘查选区和快速勘查评价提供了可参考的经验。

1 区域成矿地质背景

1.1 智利科皮亚波地区海岸山带岩浆弧-弧后盆地与金属成矿系统

早侏罗世智利北部活动大陆边缘俯冲重新启动, 在海岸山带形成钙碱性岩浆弧并在其东侧形成一系列硅铝质海相拉张盆地。岩浆弧的基底为晚古生代期间形成的增生楔, 物质组成为巨厚安山岩夹海相和陆相沉积岩, 深部为辉长岩-花岗闪长岩 (K-Ar 年龄 190~115 Ma; Boric et al., 1990)。弧后盆地的构造型式为以正断层为边界的半地堑, 基底为侵入岩和火山岩, 充填物为火山-沉积岩和陆-海相沉积物 (Mpodozis and Ramos, 1990)。晚侏罗世一早白垩世阿鲁卡 (Aluk) 板块向南东方向的高角度斜向俯冲消减作用下, 岩浆弧产生左旋脆韧性滑动, 形成展布于智利海岸山带的北东-南西西向阿塔卡玛断裂带, 该断裂带在左旋滑移过程中张扭性/张性变形交互产生, 是 IOCG 矿床的主要控矿构造 (Hervé et al., 1987; Oyarzun et al., 2003; 图 1)。至晚白垩世, 阿鲁卡和南美板块间的高角度俯冲转变为较缓的俯冲机制, 岩浆弧-弧后盆地演化阶段结束, 岩浆活动休止并转换为挤压变形机制 (Uyeda and Kanamori, 1979)。

在科皮亚波地区的曼托贝尔德到坎德拉利亚, 主岩浆弧物质组成主要为早白垩世沿阿塔卡玛断裂带上涌侵位的花岗岩类, 局部为弧间局限盆地充填的中-上侏罗统 (La Negra 组)、上侏罗一下白垩统 (Sierra Indiana 组) 的火山碎屑岩和安山质熔岩。花岗岩类包括曼托贝尔德的 Sierra Dieciocho 石英闪长岩和花岗闪长岩 (126~120 Ma; Lara and Godoy, 1998), Cerro Negro Norte (CNN) 的 Sierra Blanca 二长岩和二长闪长岩 (112~108 Ma; Arévalo, 1995), 坎德拉利亚地区的 Sierra La Brea 二长闪长岩和闪长岩 (119~116 Ma; Arévalo, 1995)。这些花岗岩类在曼托贝尔德地区侵入到中-上侏罗统 La Negra 组的安山质熔岩和火山碎屑岩中, 在 CNN 地区侵入到上侏罗一下白垩统 Sierra Indiana 组的安山岩和火山角砾岩中。La Negra 组和 Sierra Indiana 组在该段主岩浆弧带仅局

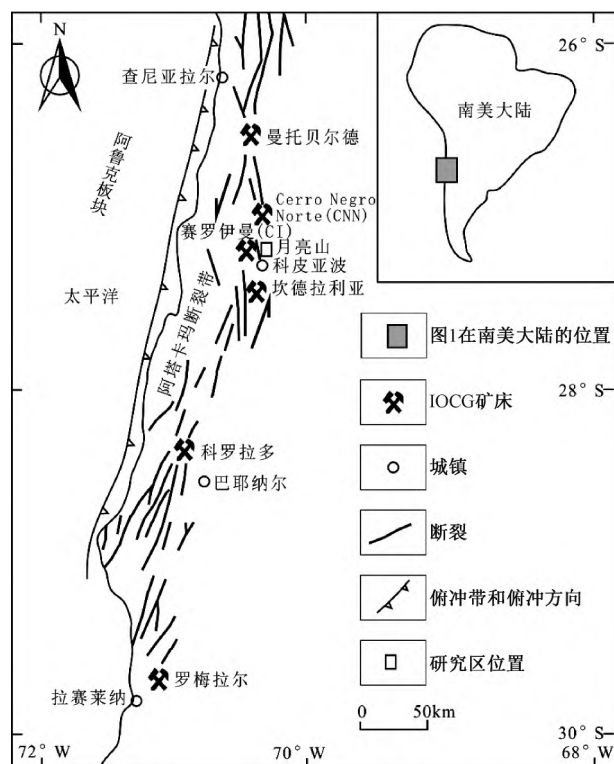


图1 智利中北部阿塔卡玛断裂带和 IOCG 矿床

Fig.1 Atacama fault zone and IOCG deposits in north central Chile

部断续出露,分别为曼托贝尔德 Cu-Au 型 IOCG 矿床和赛罗伊曼 (CI) -CNN 磁铁矿型 IOCG 矿床的主要赋矿围岩。主岩浆弧带东侧的弧后盆地盆内充填地层体在北段主要为 Bandurrias 组洪泛平原相红色砂岩和泥岩,其上覆地层为下白垩统海相沉积岩 Charnacillo 群,主要分布在该段的南部,显示出由北至南由陆相逐渐过渡为深水相,坎德拉利亚 Cu-Fe-Au (-Ag-Zn) 型 IOCG 矿床赋存在 Charnacillo 群地层单元中 (图 2)。花岗岩类侵入岩和其东侧的海相火山沉积岩序列构成了主岩浆弧和弧后盆地间明显的岩相界限。中白垩世期间火山弧进一步东移,且转变为陆相火山弧,以巨厚的晚白垩世 Cerrillos 组陆相沉积岩、安山岩和火山碎屑岩组合为其主要特征。

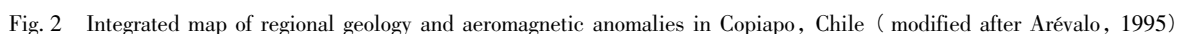
阿鲁卡板块由北西向南东俯冲和中太平洋超级地幔柱联合效应下 (Oyarzun et al., 2003),在曼托贝尔德-CNN 之间可能造成局部俯冲推力的增大,使该部位的火山-岩浆活动在中侏罗世首先开启,大规模的火山喷发-溢流-岩浆侵入活动脉动式持续至早白垩世晚期,形成规模巨大的火山高地,表现为大面积出露的早白垩世深成侵入岩

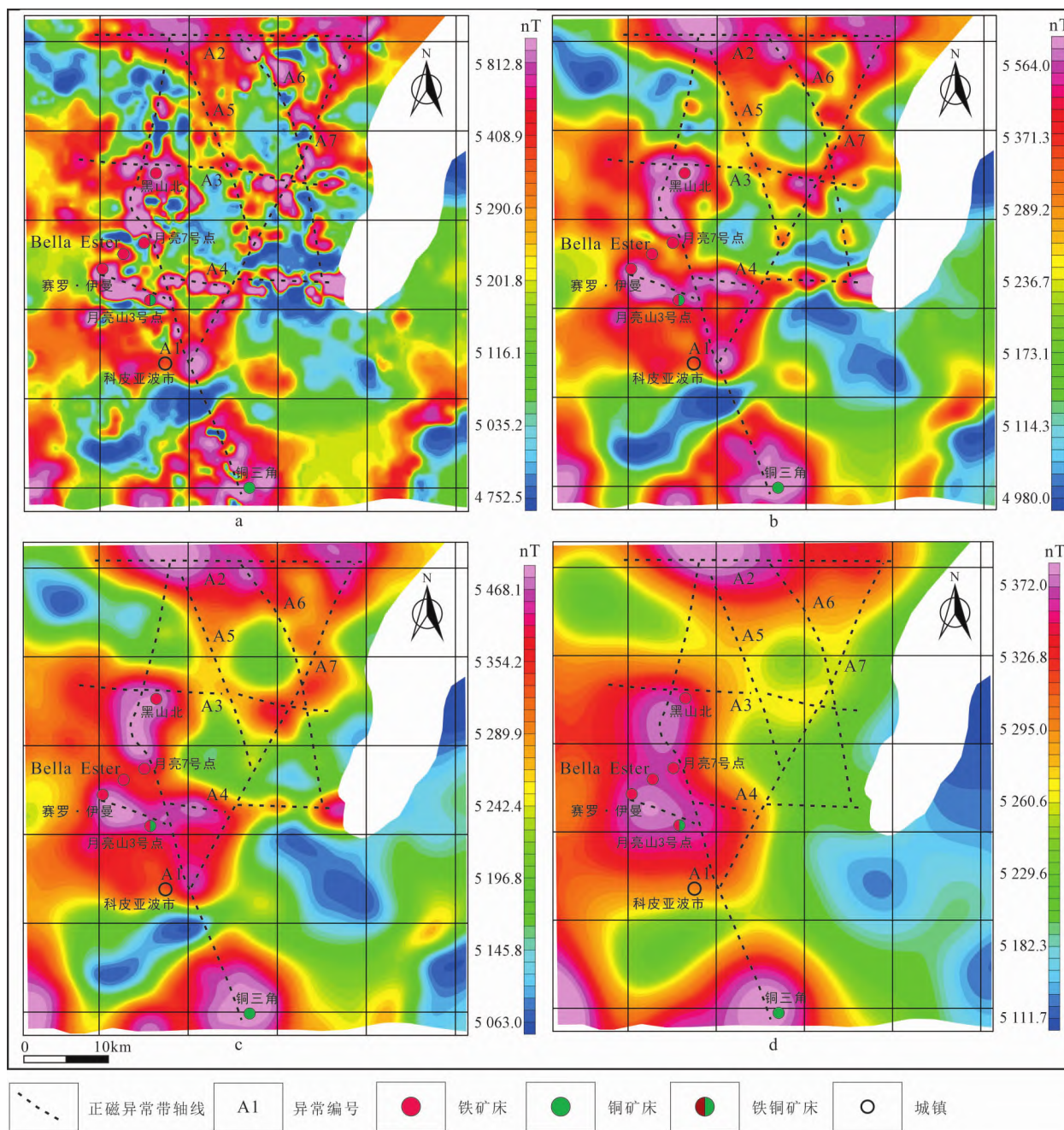
(Lara and Godoy, 1998)。在火山高地的北侧和南侧局限弧间盆地依次沉积了巨厚的中性火山角砾岩和火山熔岩,分别为曼托贝尔德 Cu-Au 型 IOCG 矿床和 CI-CNN 磁铁矿型 IOCG 矿床提供了形成环境,对应的弧后盆地为盆内高地河流相和洪泛平原相碎屑岩沉积,向南弧后盆地水体不断加深,在坎德拉利亚过渡为深水环境,为坎德拉利亚 Cu-Fe-Au (-Ag-Zn) 型 IOCG 矿床形成创造了良好的构造岩相条件。在阿鲁克板块由北西向南东俯冲动力背景下,以曼托贝尔德南部为巨大火山-岩浆活动中心的火山-岩浆活动从曼托贝尔德向坎德拉利亚迁移是曼托贝尔德 Cu-Au 型 IOCG 矿床、坎德拉利亚 Cu-Au-Ag-Zn 型 IOCG 矿床、CI-CNN 磁铁矿型 IOCG 矿床依次形成的内在动力机制,而 CI-CNN 磁铁矿型 IOCG 矿床为智利海岸山带 IOCG 矿床系列的深部单元,在形成时间序列上体现为最晚阶段。

1.2 航磁异常特征

科皮亚波地区航磁异常特征呈现 7 条主要的正磁异常带,以走向近南北向、北东向、北西向、东西向的条带状构成正磁异常格架并分割负磁异常 (图 3)。A1 正磁异常带为中部向西突起的弧形展布特征,北部呈北北东向,南部呈北北西向 (图 3a),异常带宽度大、强度高。A2—A4 正磁异常带走向均为近东西向,异常带宽度和强度相对 A1 正磁异常带均较弱。A5、A6 正磁异常带在区内呈北北西向,异常走向延伸和宽度规模均较小、强度低。A7 正磁异常带在区内呈北东向,在区内延伸长度较大,但宽度和异常幅度较 A1 异常带相对较弱。在航磁异常分别向上延拓 1000 m、2000 m、5000 m 后, A5、A6 北北西向正磁异常带和 A7 北东向正磁异常带首先逐步减弱并依次消失,随后 A3、A4、A2 近东西向正磁异常带逐步减弱并依次消失 (图 3b、3c); 上延 5000 m 后仅剩余 A1 深源异常 (图 3d), 并且 A2、A3、A4 东西向异常和 A1 异常复合部位深源异常显著,表现为深源岩浆活动中心。近东西向 A2、A3、A4 正磁异常带对应的磁源体延深大于 A5、A6 北北西向正磁异常带和 A7 北东向正磁异常带对应的磁源体延深。

在坎德拉利亚航磁异常存在显著的近南北向和东西向正磁异常复合特征, Gimenez et al. (2019) 通过重力异常和重力垂向导数分析认为在科皮亚波南部产生的北东东向重力异常与海山





a— ΔT 异常; b—上延高度 1000 m; c—上延高度 2000 m; d—上延高度 5000 m

图3 智利科皮亚波地区航磁 ΔT 异常和系列上延异常图

Fig. 3 Maps showing aeromagnetic anomaly and anomalies upward in Copiapo, Chile

(a) ΔT anomaly; (b) Upward continue to 1000 m; (c) Upward continue to 2000 m; (d) Upward continue to 5000 m

(科皮亚波海岭)俯冲造成的局部熔融体上涌的岩浆活动有关。该重力异常带和科皮亚波南近东西向航磁异常大致吻合,可能为坎德拉利亚矿床成矿深度较曼托贝尔德成矿深度相对较深的内在机制(岩浆源区)。系列上延航磁异常特征显示近南北向正异常和东西向异常复合部位具有显著的深源异常,表明存在深源岩浆活动中心,构成了该

区 IOCG 矿床和隐伏矿床战略性勘查靶区优选的地质模型和区域预测标志。

1.3 勘查靶区优选

区域 IOCG 矿床受近南北向阿塔卡玛断裂带控制,东西向断裂附近叠加平移运动产生的张裂空间为大型磁铁矿型 IOCG 矿床的就位空间,曼托贝尔德、CI、CNN、坎德拉利亚等大型 IOCG 矿床均

早于磁铁矿化,北北东向左旋走滑剪切变形产生的次级北西向高角度张性断裂构造扩容空间为磁铁矿的淀积提供了良好的场所。糜棱岩带为同岩浆侵入期构造,是阿塔卡玛走滑断裂系统组成部分,其次级断裂为主要控矿构造(方维萱和李建旭,2014;方维萱等,2018)。

2.1.3 矿化和蚀变特征

CI-CNN 的磁铁矿型 IOCG 矿床多为北东和北西走向,中一大型矿床常形成于北东向和北西向断裂构造夹持部位。该类矿床金属硫化物不发育,硫化物和晚期的石英碳酸盐化有关,分布在磁铁矿带的外围,但也有少量黄铁矿±黄铜矿呈稀疏微细脉状或稀疏星点状分布在块状磁铁矿体中。磁铁矿体根据结构构造主要可分为3种类型:块状矿体、角砾状矿体和浸染状矿体。块状矿体又可分为脉状、不规则状和似层状3种形式,脉状矿体主要受北北东向、北北西向高角度断层控制,产状直立—近直立,厚1~2 m,长数十米;不规则块状矿体规模不等,形态包括受构造交汇部位或膨大部位控制的囊状或透镜状矿体;似层状矿体基本和地层整合,和围岩的接触带清晰,厚度几米至十余米。角砾状矿体和浸染状矿体通常位于块状矿体的外侧并呈渐变接触关系,角砾状矿体主要表现为阳起石化蚀变岩石遭受强烈的角砾岩化,磁铁矿细脉充填在角砾间的裂隙中或交代部分阳起石。磁铁矿体的外带,磁铁矿细脉减少,浸染状磁铁矿增多,形成浸染状矿化体(Marschik and Fontboté, 1996; Ray and Lefebure, 2000; Sillitoe, 2003; 方维萱等, 2009; 方维萱, 2012; 李天成等, 2015)。围岩普遍遭受强烈的蚀变并围绕铁矿体呈现出明显的分带性,内带为阳起石化带,空间上分布在磁铁矿体周围数百米范围内构成阳起石化晕,越靠近磁铁矿体阳起石化越强烈,向外阳起石化逐渐减弱;中部为硅化-电气石化带;外带为钠化蚀变带。

2.2 勘查区物性参数特征

2.2.1 磁性参数特征

由于勘查区(月亮山7号点)大面积被第四系砂砾岩覆盖,岩矿石磁性数据参照具有可类比地质特征的月亮山3号点(位置见图4)的钻孔岩心和少量地表岩矿石露头的原位测定。由于大部分磁参数数据测自钻孔岩心,磁参数只进行了磁化率物性参数的测定和统计,作为文中磁异常解释和评价的参考。磁化率测定采用 SM-30 磁化率

仪,测量点数共计692点,其中钻孔岩心原位检测点数422个,全孔检测,点距1~2 m,钻孔编号分别为:ZK11-1、ZK6E-1、ZK12-1、ZK12-2(4个钻孔的孔位坐标分别为:365256, 6979931; 365208, 6980419; 365335, 6980514; 365134, 6980562; 坐标系统为 WGS84)。磁化率参数统计结果见表1。磁性参数测试结果显示,磁铁矿磁性最强($693.00 \times 10^{-3} \text{ SI}$),含铜磁铁矿次之($195.80 \times 10^{-3} \text{ SI}$);磁铁矿化硅化安山角砾岩、磁铁矿化安山岩、磁赤铁矿磁性较强,磁化率分别为 $63.20 \times 10^{-3} \text{ SI}$ 、 $55.30 \times 10^{-3} \text{ SI}$ 和 $51.20 \times 10^{-3} \text{ SI}$,以上岩矿石在该区为强磁性,是引起该区负磁异常的主要岩矿石,此类异常特征是圈定矿致异常的主要标志。闪长岩具有较高的磁性,磁化率值 $39.10 \times 10^{-3} \text{ SI}$,在该区引起幅值较低的负磁异常,是判定岩体展布特征的标志。安山岩、含铁铜安山质角砾岩、黄铁矿化硅化安山角砾岩为中等磁性特征,磁化率值分别为 $14.81 \times 10^{-3} \text{ SI}$ 、 $12.42 \times 10^{-3} \text{ SI}$ 和 $12.21 \times 10^{-3} \text{ SI}$,引起的磁异常代表该区背景异常,含铁铜安山质角砾岩和黄铁矿化硅化安山岩由于在空间上和(含铜)磁铁矿关系密切,通常和强磁异常相叠加形成叠加异常;赤铁矿化硅化安山角砾岩、赤铁矿、安山质角砾岩为中低磁性。

2.2.2 电性参数特征

岩矿石电性参数参照勘查区东南方向约2.5 km 具有可类比地质特征的月亮山3号点(位置见图4)的地表岩矿石标本测试数据。岩矿石电阻率和极化率参数测定方法采用泥团法,小对称四极装置。主要岩矿石电阻率和极化率参数测定结果见表2。结果显示磁铁矿电阻率平均值为 $55.12 \Omega \cdot \text{m}$,极化率平均值为 5.78%,具有低阻高极化特征。含铜磁铁矿电阻率平均值为 $330.58 \Omega \cdot \text{m}$,极化率平均值为 6.29%,具有中等电阻率高极化特征。黄铁矿化安山岩电阻率平均值为 $511.76 \Omega \cdot \text{m}$,极化率平均值为 3.71%,在该区表现为中等电阻率和中等极化率特征。蚀变安山岩和辉绿岩为中等电阻率低极化特征,赤铁矿、闪长岩、构造角砾岩为相对高阻低极化特征。

3 勘查区地球物理异常特征与工程验证

3.1 磁异常特征

针对磁铁矿型 IOCG 矿床成矿地质-地球物理

表 1 勘查区岩(矿)石磁化率参数测试统计表

Table 1 Statistical table of magnetic susceptibility parameters of rocks (ores) in the exploration area

岩矿石名称	标本数/块	SI/ $\times 10^{-3}$ (国际单位制)		u _{gs} (高斯单位制)	
		极值	平均值	极值	平均值
安山岩	34	9.47~25.50	14.81	754~2029	1179
安山质角砾岩	37	1.06~16.80	6.88	84~1337	547
构造角砾岩	33	0.13~8.27	3.70	10~658	294
硅化构造角砾岩	51	0.002~9.710	3.15	0~773	251
蚀变安山岩	31	0.22~6.84	2.62	18~544	241
闪长岩	162	14.70~68.50	39.10	1170~5451	3111
赤铁矿	65	0.14~21.70	6.95	11~1727	553
赤铁矿化硅化安山角砾岩	114	0.66~27.00	8.60	53~2149	688
磁铁矿化安山岩	28	24.80~124.00	55.30	1974~9868	4400
磁铁矿化硅化安山角砾岩	18	28.60~117.00	63.20	2276~9311	5032
磁赤铁矿	22	37.80~88.00	51.20	3008~7003	4074
磁铁矿	30	317~(>1000)	693.00	25226~(>80000)	55147
含铁铜安山质角砾岩	15	0.93~27.20	12.42	74~2165	988
含铜磁铁矿	9	77.10~526.00	195.80	6135~41858	15581
黄铁矿化硅化安山角砾岩	14	1.34~28.10	12.21	107~2236	971

表中“>”表示大于

表 2 勘查区岩(矿)石电阻率、极化率参数测试统计表

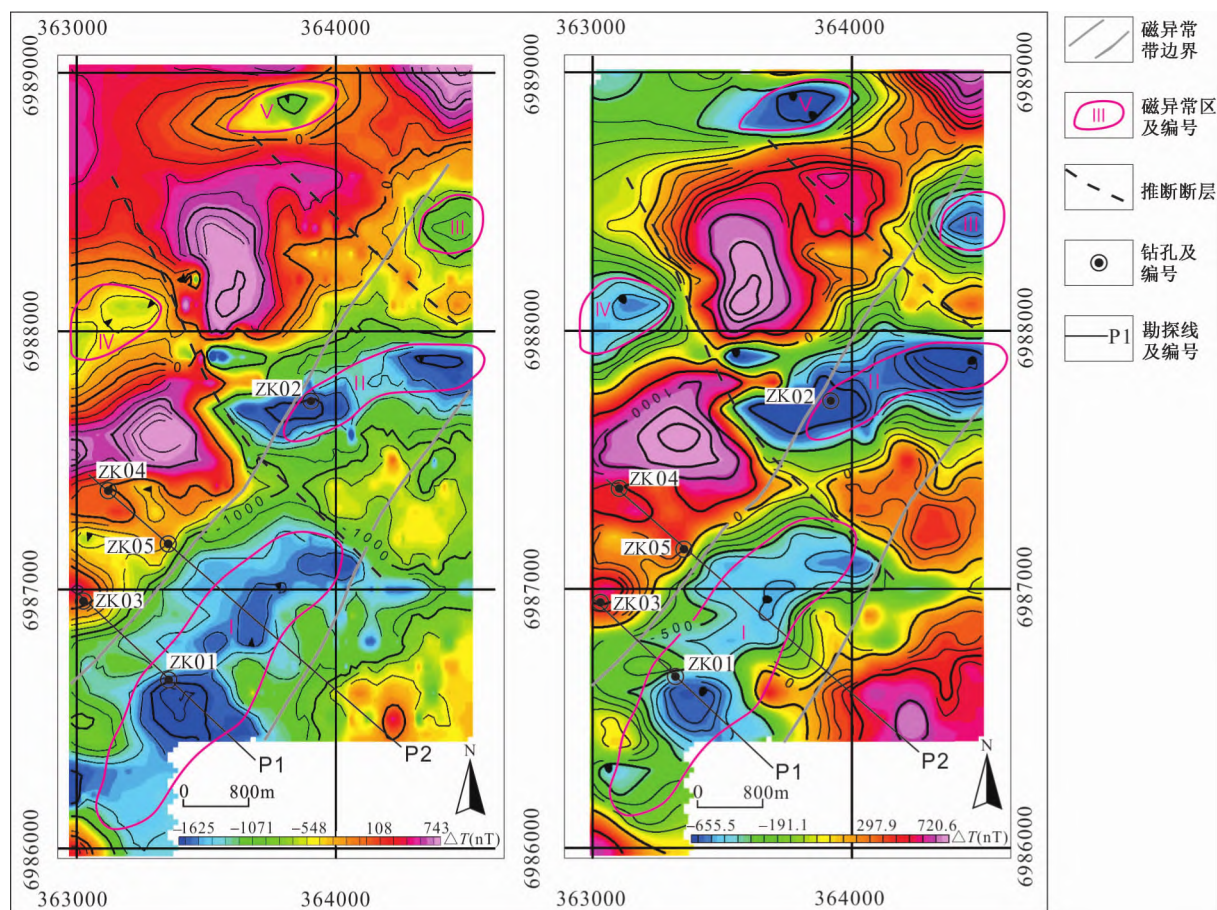
Table 2 Statistical table of resistivity and polarizability parameters of rocks (ores) in the exploration area

岩矿石名称	标本数/块	极化率/%			电阻率/($\Omega \cdot m$)		
		最小	最大	平均值	最小	最大	平均值
赤铁矿	10	1.04	2.71	1.65	895.14	1835.30	1117.20
蚀变安山岩	6	0.69	1.89	1.20	147.09	813.03	529.80
安山岩	13	0.67	1.65	1.13	800.00	1350.96	1023.20
闪长岩	10	0.69	1.67	1.11	811.59	1822.71	1117.75
含铜磁铁矿	6	3.45	14.75	6.29	45.85	1430.97	330.58
磁铁矿	11	3.94	14.34	5.78	15.93	170.45	55.12
辉绿岩	2	0.76	1.00	0.88	160.84	485.56	323.20
构造角砾岩	13	0.45	2.11	1.19	853.03	1440.00	1116.29
黄铁矿化角砾岩	6	2.96	5.03	3.71	254.52	938.89	511.76

特征和矿区地表地质条件,首先采用地面高精度磁测圈定磁异常,研究磁异常的平面分布和形态特征,筛选矿致异常。经日变改正、正常场改正和高度改正后的磁异常平面图如图 5a 所示,区域场改正后的剩余磁异常平面图如图 5b 所示。剩余磁异常图中表现出 5 处明显的负磁异常区,编号分别为 I、II、III、IV、V 号磁异常(图 5b),其中 I、II、III 号异常在勘查区的东南部构成一条长约 2800 m 宽约 500 m 的北东向的负磁异常带,该负磁异常带的北西侧为显著的正磁异常带,正磁异常带中分布有两处小规模的低幅值负磁异常区,异常编号 IV 号和 V 号,位于勘查区的北西部(图 5b)。从图 5b 可以看出 II 号负磁异常相对 III 号负磁异常具有明显的左旋平移特征,各自北西侧相伴的正磁异常具有一致的平移特征,显示 I、II 和 III 号负磁异常构成的北东向负磁异常带受后期北西向断裂构造切割改造并产生左旋平移。其中

I 号负磁异常规模最大,分布于勘查区西南部第四系覆盖区,呈北东向拉长,走向长约 1300 m,宽约 300 m; II 号异常规模次之,分布在勘查区的东中部,走向长约 750 m,宽约 150 m; III、IV、V 号异常规模较小,III、IV 号异常呈近等轴状,直径分别约 240 m 和 260 m; V 号异常平面上呈椭圆形,长轴约 380 m,短轴约 170 m。I、II 号磁异常受覆盖层影响均呈现为中等幅值的磁异常,III、IV、V 号为弱磁异常。由于勘查区地处南半球低纬度地区,根据地磁要素结合磁源体形态和产状特征,磁源体产生的磁异常以南东侧为负磁异常、北西侧相伴正磁异常为特征,负磁异常强度略大于正磁异常,磁源体对应于正负异常梯度带上。

前期分别对 I、II 号磁异常部署了验证钻孔 ZK01、ZK02(钻孔位置见图 5),取得了较好的见矿效果。ZK01 穿矿总厚度 55 m,平均品位 TFe26%,其中高品位段矿芯长 8 m,全铁平均品



a—原始磁异常; b—剩余磁异常

图5 勘查区(月亮山7号点)IOCG型铁铜矿区磁异常平面图

Fig. 5 Plan of magnetic anomaly of IOCG iron-copper deposits in the exploration area (Spot 7 in the Moon Mountain area)

(a) Original magnetic anomaly; (b) Remnant magnetic anomaly

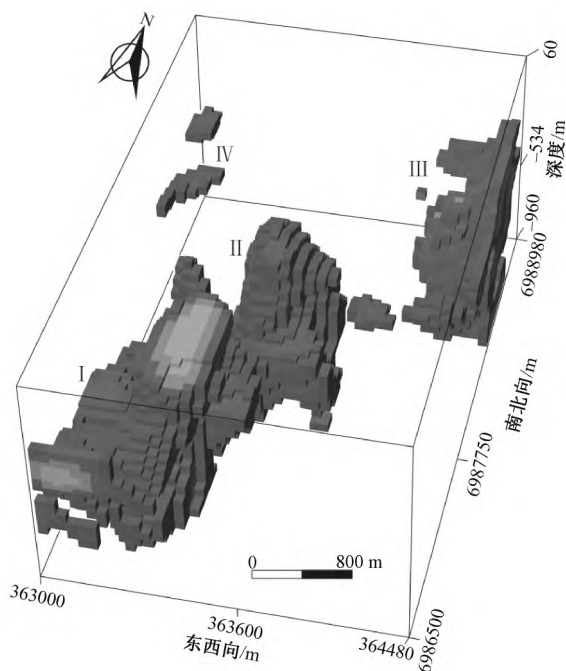
位 69.3%。ZK02 钻孔穿矿总厚度 20.79 m, 全铁平均品位 25.51%~29.29%。

三维反演磁化率成像假设地下地质体仅受感磁影响, 磁化率变化范围为 0~1SI。反演输入数据为进行了各项改正和飞点剔除等数据处理, 并且采用了二次多项式区域场改正后的剩余磁异常。为了降低近地表高频噪声输入数据向上延拓了深度单元的半宽 (5 m)。网格尺寸水平方向为 20 m, 垂直方向为 10 m。三维反演磁化率模型见图 6, 圈定三维模型的磁化率值为 0.65SI, 在该区只有磁铁矿体具有此高值磁化率, 表明反演计算的磁源体为强磁性的磁铁矿体。上述的 5 个磁异常区除 V 号磁异常反演后由于磁化率模型体向北偏移在图示区没有显示外, 其余 4 处磁异常在反演模型中均有很好的呈现, 反演模型受该区正常地磁参数影响向北西方向偏移约 350 余米, 反演模型显示 I、II 号磁异常所对应的磁源体延深大, 最大延伸至地表下

约 650 m 且规模大, 显示出极大的资源潜力; III 号磁异常延深约 460 m, 规模居中; IV 号磁源体向下延伸较小, 向下延伸至地表下约 100 余米。

3.2 激电异常特征和综合解释

根据勘查区地质特征、磁异常特征和三维反演磁化率模型, 在 I 号磁异常区分别针对南部和中部的两个磁异常中心部署了 P1、P2 两条激电测深剖面 (剖面位置见图 5), 采用磁、电综合异常以及磁力反演结果和 IP (电阻率、极化率) 反演综合模型对隐伏矿体准确定位, 为钻探验证提供精确靶位。以 P2 激电测深剖面为例, 电阻率异常显示出东西两个显著的低阻异常区 (图 7), 并且表现出西部低阻异常范围明显大于东部异常, 根据前期磁异常验证钻孔揭露矿体情况进而认为存在东、西两个矿化带, 电阻率异常特征显示西部矿化带规模明显大于东部矿化带。P2 剖面西部低阻异常在剖面中宽度约 500 m, 由 3 个低阻异常中



图中灰度体为反演磁化率 $\geq 0.65\text{SI}$ 的磁性体,灰度由浅至深表示反演磁化率由 $0.65 \rightarrow 0.90\text{SI}$

图6 反演三维磁化率模型图

Fig. 6 Model of three-dimensional magnetic susceptibility inversion (coordinate unit: m)

The gray volumes are the magnetic volumes with inverse magnetic susceptibility $\geq 0.65\text{SI}$, and the grayscale from light to dark indicates that the inverse magnetic susceptibility changes from 0.65 to 0.90SI

心构成,低阻异常中心的反演电阻率异常极小值约 $30\ \Omega\cdot\text{m}$;东部低阻异常宽度约90 m,反演电阻率异常极小值约 $45\ \Omega\cdot\text{m}$ 。激电测深剖面的反演高极化率异常中心和低阻异常中心并不完全对应,低阻异常中心对应的极化率异常约为 $6\%\sim 8\%$,显示磁铁矿体在该区可能产生中等的极化率异常。高强度极化率异常(幅值约 $10\%\sim 15\%$)位于低阻异常的旁侧或底部,并且低阻异常规模大时高强度极化率异常规模相对变小、幅值相对降低,低阻异常规模小时极化率异常规模和强度相对大,可能显示该区铁大规模富集时硫化物相对不发育,硫化物通常为受后期热液影响而产在铁矿体的旁侧或底部局部范围。根据磁铁矿型 IOCG 矿床成矿地质特征,上述磁化率-电阻率-极化率异常模式具有矿致综合异常模式特征。对比分析图7中的反演磁化率和反演电阻率断面,反演电阻率断面显示出低阻体规模西部矿化带显著大于东部矿化带,而反演磁化率断面在东部磁化率异常对低阻异常

没有明显显示,但对西部低阻异常磁化率断面呈现出范围较大的高磁化率异常,根据磁、电综合异常推动了进一步找矿重点向西部异常带转移。

根据电阻率异常特征结合反演磁化率模型,对圈定的西部高磁、低阻异常体进行了钻探验证,在P2剖面对西部矿化带(由3个低阻异常中心组成)两侧的2个低阻异常中心分别布置了ZK04、ZK05两个钻孔(图7)。ZK04钻孔穿矿总厚度75 m,该孔未揭露厚大矿体,共揭露25层薄矿体,单层矿体厚度 $1.5\sim 7.5\text{ m}$,全铁平均品位 $20.29\%\sim 53.32\%$ 。ZK05钻孔根据铁品位分析结果揭露4层矿体,单矿层穿矿厚度 $27.00\sim 150.25\text{ m}$,铁平均品位 $22.46\%\sim 28.19\%$,穿矿总厚度238.4 m,终孔深度仍未揭穿第4层厚大富磁铁矿体。

钻探验证结果结合成矿地质-地球物理异常模式综合分析,认为ZK05号钻孔对西部矿化带北中部的深部进行了揭露,ZK04号钻孔仅触及西部矿化带的西边缘带,未触及主矿化体。ZK04、ZK05钻孔岩心均观察到强烈硅化和电气石化蚀变,为该类矿床典型的外带蚀变组合特征。反演磁化率断面也显示ZK05号钻孔仅揭露了浅部高磁性体和深部高磁性体的东侧边部,ZK04号钻孔仅触及高磁性体的西侧边部,验证钻孔夹持区大范围高磁化率-低电阻率异常区尚未工程验证,显示出巨大的找矿空间(图7)。

4 结论

(1) 智利科皮亚波地区大中型磁铁矿型 IOCG 矿床产出位置和南北向、东西向磁异常带的复合部位具有良好对应关系,这些复合部位存在深源磁源体,应为深源岩浆活动中心,是战略性勘查靶区优选的航磁异常标志。通过三维反演磁化率成像、反演电阻率和极化率成像,磁铁矿型 IOCG 矿床的块状磁铁矿体产生明显的高磁化率-低电阻率-低极化率异常,以形成高磁化率-低电阻率异常中心为主要特征。在磁铁矿体的外带由于后期的热液作用有小规模的黄铁矿和黄铜矿等硫化物叠加,产生一定的激电效应,在高磁化率-低电阻率异常中心的外围、底部或旁侧形成一定的极化率异常,是隐伏矿床(体)定位预测的综合地球物理异常模式。

(2) 反演磁化率模型和钻探结果显示反演磁

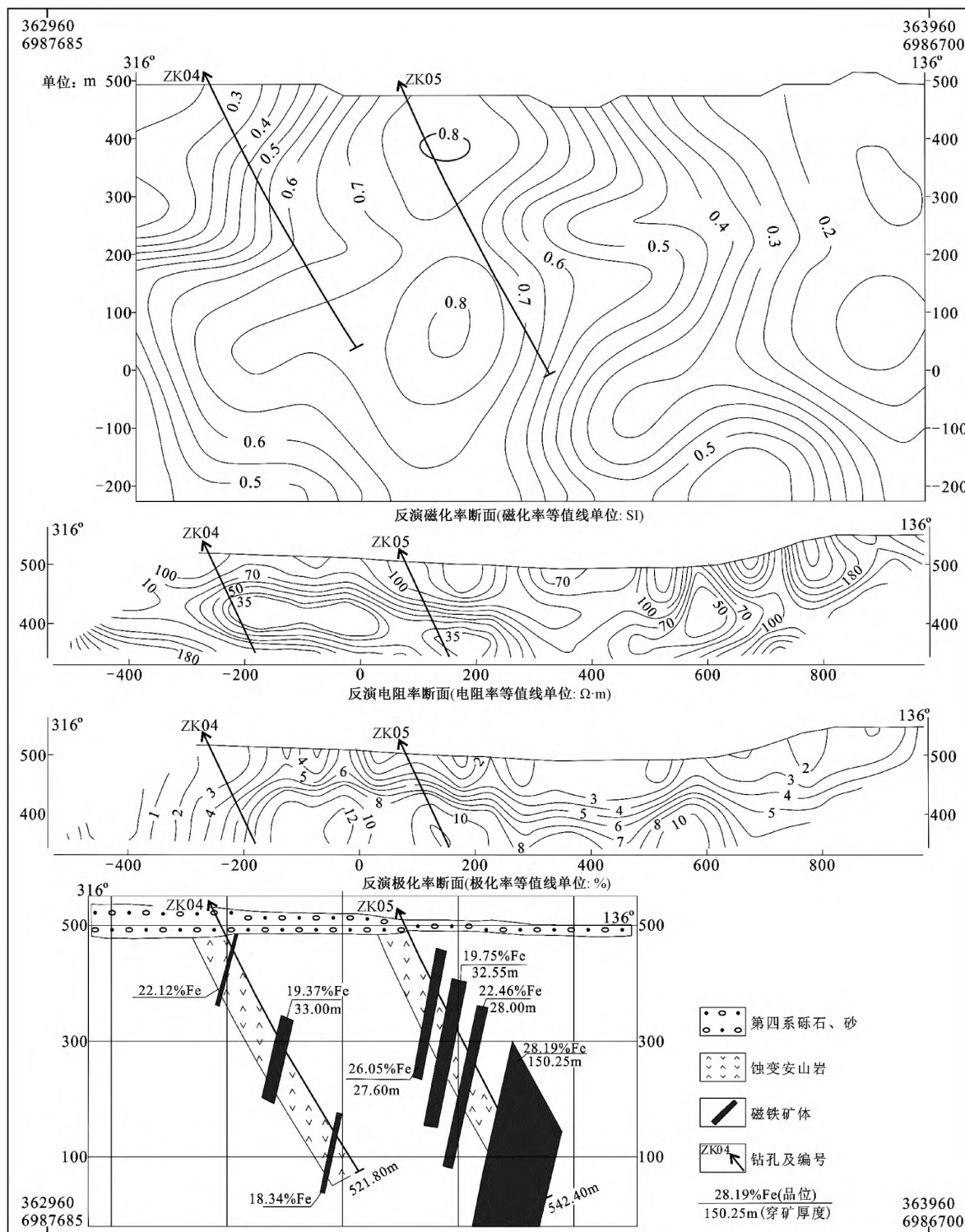


图 7 月亮山 IOCG 型铁铜矿区 P2 剖面综合断面图

Fig. 7 Integrated section of Profile P2 of the IOCG iron-copper deposits in the Moon Mountain area

源体和矿体吻合良好, 但由于未考虑剩磁影响仍存在一定偏移。有条件时应测定主要岩矿石的剩余磁化强度参数, 通过三维磁力数据反演恢复地下磁源体的分布提高磁异常地质解释的精确度。

在重要磁异常地段辅以激电测深剖面为钻探验证提供精确靶位, 是该类型隐蔽 (隐伏) 矿床高效勘查和快速评价的有效技术方法组合。

谨将此文献给有色金属矿产地地质调查中心成

立 20 周年。

References

- ARÉVALO C. 1995. Mapa Geológico de La Hoja Copiapo, III Región de Atacama [CM]. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 8, escala 1: 100.000.
- BENAVIDES J, KYSER T K, CLARK A H, et al., 2007. The Mantoverde iron oxide-copper-gold district, III Región, Chile: the role of regionally derived, nonmagmatic fluids in chalcopyrite mineralization [J]. *Economic Geology*, 102 (3): 415-440.
- BORICR, DÍAZ F, MAKSAEVV. 1990. Geología y Yacimientos Metalíferos de la Región de Antofagasta [Z]. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 40: 246.
- DALLMEYER R D, BROWN M, GROCOTT J, et al., 1996. Mesozoic magmatic and tectonic events within the Andean plate boundary zone, 26°-27°30'S, North Chile: constraints from ⁴⁰Ar/³⁹Ar mineral ages [J]. *The Journal of Geology*, 104 (1): 19-40.
- ESPINOZA S, VIVALLO W, HENRIQUEZ F. 1994. Geología y genesis de mineralización metálica en el distrito ferrífero de Cerro Imán, Copiapó, Chile [J]. *Congreso Geológico Chileno*, 7: 799-802.
- FANG W X, LIU Y L, ZHANG S L, et al., 2009. Three types of continental geodynamics and metallogenic models for IOCG (Iron-oxide Copper Gold Deposits) from the global view [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39 (3): 404-413. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, 2012. R&D on new mapping technology of geochemical Lithofacies in prediction and exploration for Iron-Oxide Copper Gold Deposits (IOCG) [J]. *Advances in Earth Science*, 27 (10): 1178-1184. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, YANG X Y, GUO M H, et al., 2013. Relationships between alkaline Ti-Fe-Rich Gabbros and iron-oxide copper-gold deposits in the Baixila Ore District, Yunnan [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37 (2): 242-261. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, LI J X, 2014. Metallogenic regulations, controlling factors, and evolutions of iron oxide copper and gold deposits in Chile [J]. *Advances in Earth Science*, 29 (9): 1011-1024. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, DU Y L, LI J X, et al., 2018. Large scale structural petrography mapping technology and prospecting prediction [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-394. (in Chinese)
- FANG W X, 2019. Magmatic intrusive tectonic system I: tectonic Lithofacies mapping and ore-prediction [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43 (3): 473-506. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, WANG S C, JIA R X, et al., 2021. Theoretical innovation, technology research and development, and frontiers on large-scale mapping of tectonic lithofacies [J]. *Mineral Exploration*, 12 (7): 1488-1518. (in Chinese with English abstract)
- GIMENEZ M, ACOSTA G, ALVAREZ O, et al., 2019. The subduction of the Copiapó aseismic ridge, is the causing of the formation of metallic minerals deposits in North of Chile and Argentina? [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 10 (6): 471-476.
- HERVÉ F, GODOY E, PARADA M A, et al., 1987. A general view on the Chilean-argentine Andes, with emphasis on their early history [M] // MONGER J W H, FRANCHETEAU J. Circum-Pacific Orogenic belts and evolution of the Pacific Ocean Basin. Washington: American Geophysical Union: 97-114.
- HITZMAN M W, 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, when and why [M] // PORTERT M. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective. Adelaide: PGC Publishing: 9-25.
- LARA Land GODOY E. 1998. Mapa Geológico de La Hoja Quebrada Salitrosa, III Región de Atacama [R]. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 4, escala 1: 100.000.
- LI J W, ZHU G R, ZHANG D Q, et al., 2009. Discovery of Dongjun lead-zinc-silver deposit in Inner Mongolia: an integrated application of geological, geochemical and geophysical prospecting methods [J]. *Mineral Deposits*, 28 (6): 830-837. (in Chinese with English abstract)
- LI J X, FANG W X, LIU J J, 2011. Types and characteristics of regional tectonics and ore-field structures of iron oxide-copper-gold deposits in Chile [J]. *Geology and Exploration*, 47 (2): 323-332. (in Chinese with English abstract)
- LI T C, YANG X Y, PENG X M, et al., 2015. Geological characteristics and prospecting criteria of the magnetite deposits in Cerro Iman-Cerro Lunar-Cerro Norte area, central-northern Chile [J]. *Mineral Exploration*, 6 (1): 77-85. (in Chinese with English abstract)
- LIU R, MA J Q, LI Q C, et al., 2016. Gravity, magnetic and electric comprehensive geophysical prospecting for deep structures in Hetao Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 22 (4): 943-954. (in Chinese with English abstract)
- LÜ Q T, MENG G X, YAN J Y, et al., 2019. Multi-scale exploration of mineral system: concept and progress: a case study in the middle and lower reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt [J]. *Geology in China*, 46 (4): 673-689. (in Chinese with English abstract)
- MAO J W, YU J J, YUAN S D, et al., 2008. Iron oxide-copper-gold deposits: characteristics, present research situation and ore prospecting [J]. *Mineral Deposits*, 27 (3): 267-278. (in Chinese with English abstract)
- MARSCHIK R, FONTBOTÉ L, 1996. Copper (-iron) mineralization and superposition of alteration events in the Punta del Cobre belt, northern Chile [M] // CAMUS E, SILLITOE R H, PETERSON R. Andean copper deposits: new discoveries, mineralisation, styles and metallogeny. Littleton, USA: Society of Economic Geologists, Special Publication 5: 171-189.
- MARSCHIK R, FONTBOTÉ L, 2001. The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) deposits, Chile [J]. *Economic Geology*, 96 (8): 1799-1826.
- MATHUR R, MARSCHIK R, RUIZ J, et al., 2002. Age of mineralization of the Candelaria Fe oxide Cu-Au deposit and the origin of the Chilean iron belt, based on Re-Os isotopes [J]. *Economic Geology*, 97 (1): 59-71.
- MCCAFFERTY A E, PHILLIPS J D, HOFSTRA A H, et al., 2019. Crustal architecture beneath the southern Midcontinent (USA) and controls on Mesoproterozoic iron-oxide mineralization from 3D geophysical models [J]. *Ore Geology Reviews*, 111: 102966.
- MPODOZIS C, RAMOS V, 1990. The Andes of Chile and Argentina: circum-Pacific council for energy and mineral resources [J]. *Earth*

- Science Series, 11: 59-90.
- OYARZUN R, OYARZÚN J, MÉNARD J J, et al., 2003. The Cretaceous iron belt of northern Chile: role of oceanic plates, a superplume event, and a major shear zone [J]. *Mineralium Deposita*, 38 (5): 640-646.
- RAMÍREZ L E, PALACIOS C, TOWNLEY B, et al., 2006. The MantosBlancos copper deposit: an upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the coastal range of northern Chile [J]. *Mineralium Deposita*, 41 (3): 246-258.
- RYAN P J, LAWRENCE A L, JENKINS, R A, et al., 1995. The Candelaria copper-gold deposit, Chile [J]. *Arizona Geological Society Digest*, 20: 625-645.
- SHEN P, SHEN Y C, LIU T B, 2011. Geophysical-geological prospecting models for positioning prognosis of hidden metal deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 18 (3): 284-292. (in Chinese with English abstract)
- SILLITOE R H, 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view [J]. *Mineralium Deposita*, 38 (7): 787-812.
- SILLITOE R H, PERELLÓ J, 2005. Andean copper province: tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery [M] // HEDENQUIST J W, THOMPSON J F H, GOLDFARB R J, et al. *Economic geology one hundredth anniversary volume 1905-2005*. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists: 845-890.
- SKIRROW R G, MURR J, SCHOFIELD A, et al., 2019. Mapping iron oxide Cu-Au (IOCG) mineral potential in Australia using knowledge-driven mineral systems-based approach [J]. *Ore Geology Reviews*, 113: 103011.
- STEIGER R H, JÄGER E, 1977. Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 36 (3): 359-362.
- UYEDA S, KANAMORI H, 1979. Back-arc opening and the mode of subduction [J]. *Journal of Geophysical Research*, 84 (B3): 1049-1061.
- VILA T. 1996. Geology of the Manto Verde copper deposit, northern Chile: a specularite-rich, hydrothermal-tectonic breccia related to the Atacama fault zone [M] // CAMUS F, SILLITOE R M, PETERSEN R. *Andean copper deposits: new discoveries, mineralization, styles and metallogeny*. Littleton, USA: Society of Economic Geologists, Special Publication 5: 157-170.
- VIVALLO W, ESPINOZA S, HENRÍQUEZ F. 1995. Metasomatismo y alteración hidrotermal en el Distrito Ferífero Cerro Negro Norte, Copiapó, Chile [J]. *Revista Geológica de Chile*, 22: 75-88.
- ZHAI Y S, 2007. Earth system, metallogenic system to exploration system [J]. *Earth Science Frontiers*, 14 (1): 172-181. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X C, 2003. The characteristics of the overseas iron-oxide Cu-Au deposits and the present situation of the studies [J]. *Advance in Earth Sciences*, 18 (4): 551-560. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 方维萱, 柳玉龙, 张守林, 等, 2009. 全球铁氧化物铜金型 (IOCG) 矿床的 3 类大陆动力学背景与成矿模式 [J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 39 (3): 404-413.
- 方维萱, 2012. 论铁氧化物铜金型 (IOCG) 矿床地球化学岩相学填图新技术研发 [J]. *地球科学进展*, 27 (10): 1178-1184.
- 方维萱, 杨新雨, 郭茂华, 等, 2013. 云南白锡腊碱性钛铁质辉长岩类与铁氧化物铜金型矿床关系研究 [J]. *大地构造与成矿学*, 37 (2): 242-261.
- 方维萱, 李建旭, 2014. 智利铁氧化物铜金型矿床成矿规律、控制因素与成矿演化 [J]. *地球科学进展*, 29 (9): 1011-1024.
- 方维萱, 杜玉龙, 李建旭, 等, 2018. 大比例尺构造岩相学填图技术与找矿预测 [M]. 北京: 地质出版社: 1-394.
- 方维萱, 2019. 岩浆侵入构造系统 I: 构造岩相学填图技术研发与找矿预测效果 [J]. *大地构造与成矿学*, 43 (3): 473-506.
- 方维萱, 王寿成, 贾润幸, 等, 2021. 大比例尺构造岩相学填图理论创新、技术研发与发展方向 [J]. *矿产勘查*, 12 (7): 1488-1518.
- 李建旭, 方维萱, 刘家军, 2011. 智利铁氧化物-铜-金矿床区域定位构造-矿田构造类型与特征 [J]. *地质与勘探*, 47 (2): 323-332.
- 李进文, 朱广仁, 张德全, 等, 2009. 内蒙古东塔铅锌银矿床的发现: 地物化综合找矿勘查方法的运用 [J]. *矿床地质*, 28 (6): 830-837.
- 李天成, 杨新雨, 彭晓明, 等, 2015. 智利中北部赛罗伊曼-月亮山-赛罗诺尔戴磁铁矿床地质特征与找矿标志 [J]. *矿产勘查*, 6 (1): 77-85.
- 刘嵘, 马见青, 李庆春, 等, 2016. 重磁电综合地球物理探测河套盆地深部结构 [J]. *地质力学学报*, 22 (4): 943-954.
- 吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 等, 2019. 成矿系统的多尺度探测: 概念与进展: 以长江中下游成矿带为例 [J]. *中国地质*, 46 (4): 673-689.
- 毛景文, 余金杰, 袁顺达, 等, 2008. 铁氧化物-铜-金 (IOCG) 型矿床: 基本特征、研究现状与找矿勘查 [J]. *矿床地质*, 27 (3): 267-278.
- 申萍, 沈远超, 刘铁兵, 2011. 隐伏矿体定位预测的地球物理-地质找矿模型: 以地质与 EH4 双源大地电磁测深技术结合为例 [J]. *地学前缘*, 18 (3): 284-292.
- 翟裕生, 2007. 地球系统、成矿系统到勘查系统 [J]. *地学前缘*, 14 (1): 172-181.
- 张兴春, 2003. 国外铁氧化物铜-金矿床的特征及其研究现状 [J]. *地球科学进展*, 18 (4): 551-560.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

